DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230512.001

2.4 米主镜反射膜膜厚均匀性的优化设计

陈鑑辉[1,2,3]，伦宝利[1,2*]，秦松年[1,2]

（1. 中国科学院云南天文台，云南 昆明 650216；2. 中国科学院天体结构与演化重点实验室，云南 昆明 650216；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：膜厚均匀性是制备高性能光学薄膜的一项重要指标。为进一步提高 2.4 m 主镜反射膜膜厚均匀性，针对大口径望远镜镀膜设计了膜厚均匀性优化方案。基于真空热蒸发遵循的余弦分布律，结合 ZZ3200 型真空镀膜机的几何结构和望远镜镀膜的实际需求，编写膜厚计算程序，模拟膜厚理论分布情况，给出膜厚优化设计方法和优化结果。方法一：在蒸发源内侧合适的位置加入修正挡板，结果表明，挡板的曲率半径安装误差在 3 mm 以内，膜厚均匀性峰谷(Peak to Valley，PV)值由不加挡板时的 15%下降到 4%，该方法具有一定的普适性，但是挡板安装位置要精确控制；方法二：结合反射主镜中间的圆孔结构，设计双圈蒸发源，结果表明，当内外圈蒸发源的中心距分别为 10 cm 和 130 cm，且满足外圈蒸发源的数量为内圈的 12 倍时，膜厚均匀性峰谷值为 1.85%。该方法是针对中心具有圆孔镜面设计的，适用于大多数反射式天文望远镜镀膜。

关键词：望远镜镀膜；膜厚均匀性；球面夹具；修正挡板

中图分类号：O484 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2023)05-0463-08

膜厚均匀性是指膜层厚度随基板表面位置变化而变化的情况，是制备高性能光学薄膜的一项重要指标[1]。大口径反射式光学望远镜通常采用物理气相沉积的方式镀制金属高反射膜，其中以热蒸发的方式镀铝、镀金最常见。铝膜在可见光波段具有较高的反射率，金膜通常用于红外波段。由于天文望远镜口径较大，通常需要设计专门的镀膜机为主镜镀膜。除了膜层的反射率、膜层质量以外，膜厚均匀性也是制备高性能薄膜必须关注的问题。蒸发镀膜过程中影响膜厚均匀性的因素较多，主要有材料的蒸发特性、镀膜机真空室的结构尺寸、蒸发源排布方式、夹具类型、真空系统和温度等[2-4]。

天文望远镜对系统的成像质量要求较高，主镜反射膜膜厚不均匀，会导致进入光学系统平行光的波前发生改变，严重时甚至影响到主镜面型[2]。丽江 2.4 m 光学望远镜反射主镜出厂时单层铝膜的平均反射率为 91.5%，膜厚均匀性为 15%，后续重新镀膜也基本达到这一指标。对于大口径镀膜，尤其是天文望远镜反射膜，通常需要专门的大口径镀膜机。我们可以通过设计旋转行星夹具、多源蒸发、修正挡板等方法提高膜厚的均匀性。但是，在大口径望远镜镀金属反射膜时，镀膜时间短，望远镜质量大，操作风险高，不适合采用旋转行星夹具。对于大口径望远镜镀膜，通常采用多源蒸发的方法提高膜厚均匀性。Subaru 望远镜主镜口径 8.3 m，采用 288 个蒸发源同步蒸发，膜厚均匀性得到较好的控制[5]；文[6]采用 72 组钨丝蒸发源为 2.4 m 望远镜镀制铝反射膜，当蒸发源个数超过 12 时，镜面横向的膜厚极值已经基本重合。另外修正挡板的方法也常用于提高膜厚均匀性，文[7]采用平面静止挡板透视投影法设计薄膜厚度修正挡板，给出设计和实验结果；文[8]对行星旋转系统中大孔径凹面反射镜和阴影掩模设计厚度均匀分布进行优化设计，得到固定位置阴影掩模，使凹面反射镜(700 mm 孔径)的膜厚均匀性从 2.43%降低到 0.7%；文[9]对旋转夹具系统修正挡板进行仿真，并给

基金项目："西部青年学者"人才项目（E129080101）资助.
收稿日期：2023-04-01；修订日期：2023-04-12
作者简介：陈鑑辉，男，硕士研究生，主要研究天文技术与方法. Email：chenjianhui@ynao.ac.cn.
* 通信作者：伦宝利，男，正高级工程师，主要研究天文技术与方法. Email：lunbl@ynao.ac.cn.

出挡板的加工精度；文[10]设计一种扇叶形状的修正挡板，文[11]也采用修正挡板的方法，均获得较好的膜厚均匀性。但是，以上修正挡板适用的基板口径较小，不适用于较大口径的天文望远镜镀膜。目前，国内对于 2 m 级以上口径的望远镜镀膜工作，关于控制膜厚均匀性的研究较少。随着反射式天文望远镜口径不断增大，膜厚均匀性的控制难度不断增加，探索更好的、更适合大口径镀膜的膜厚均匀性优化方法十分必要。

考虑到天文望远镜主镜口径较大，吊装和翻转主镜等操作带来较大风险，通常采用自上而下的蒸发方式，主镜的反射膜朝上，蒸发源置于主镜上方。为了防止热蒸发过程中温度不均匀，导致蒸发材料滴落、喷溅到主镜上，蒸发源的排布位置受到限制，蒸发源到旋转中心的距离只能取 130 cm。为了进一步降低膜厚不均匀对主镜面型带来的附加影响，必须设计新的方案来提高大口径镀膜的膜厚均匀性。本文结合 ZZ3200-1/G 型镀膜机，对膜厚分布进行优化设计，展开对大口径望远镜镀膜过程中膜厚均匀性控制方法的研究，给出适用于大口径望远镜镀膜过程中膜厚均匀性的优化设计方案。

1 膜厚的理论分布

1.1 球面夹具膜厚分布

膜厚的理论计算主要基于 3 个假设：(1)镀膜过程中真空环境要求蒸发分子、残余气体在蒸发过程中没有碰撞；(2)蒸发分子在基板表面沉积成致密的薄膜，膜层密度与原材料相同；(3)蒸发源的蒸汽发射特性不随时间发生变化[1]。

基板表面任意一点薄膜厚度取决于真空室的几何配置、蒸发源蒸汽发射特性及真空度等因素。设蒸发材料的质量 m、密度 μ、蒸发特性 n，基于电阻热蒸发膜厚遵循的余弦分布律，基板上任一点薄膜厚度可以表示为[1]

$$t_s = \frac{m\cos^n\theta\cos\varphi}{4\pi\mu r^2}, \tag{1}$$

其中，θ 为蒸发源和基板表面面元的连线与面源法线的夹角；φ 为蒸发源和基板表面面元连线与镀膜表面法线的夹角；r 为蒸发距离。在之前 2.4 m 望远镜镀铝膜的测试中，采用 $n=1$，根据钨丝的形状进行积分，膜厚分布的模拟结果与测试结果基本吻合，因此，本文同样采用 $n=1$。球面夹具示意图如图 1。

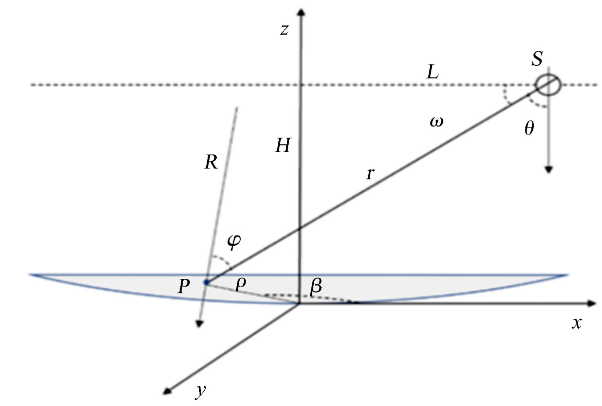


图 1 球面夹具示意图，以球面基板中心为原点建立三维坐标系，S 表示蒸发源，P 表示沉积点

Fig. 1 Schematic diagram of spherical fixture, a three-dimensional coordinate system is established with the center of the spherical substrate as the origin, S represents the evaporation source, and P represents the deposition point

钨丝上任意一点 S 相对于钨丝的中心位置用夹角 ω 表示，基板上任意沉积点 P 用极坐标(ρ, β)表示。设基板上表面的中心点为坐标原点，则发射点 S 坐标可以表示为

$$(x_S, y_S, z_S) = \left(L + \frac{d}{2}\cos\omega, 0, H + \frac{d}{2}\sin\omega\right), \tag{2}$$

沉积点 P 的坐标 $(x_p, y_p, z_p) = \left(\rho\cos\beta, \rho\sin\beta, R - \sqrt{R^2 - \rho^2}\right)$，蒸发源 S 的单位法向量 $\boldsymbol{n}_s = (0, 0, -1)$，基板上表面任意沉积点 P 的单位法向量为

$$\boldsymbol{n}_p = \left(\frac{\rho\cos\beta}{R}, \frac{\rho\sin\beta}{R}, \frac{-\sqrt{R^2 - \rho^2}}{R}\right). \tag{3}$$

由蒸发源 S 到沉积点 P 的向量为 $\boldsymbol{r}$，则蒸发距离 $r = |\boldsymbol{r}|$，则有

$$r = \sqrt{(x_p - x_S)^2 + (y_p - y_S)^2 + (z_p - z_S)^2}, \tag{4}$$

发射角余弦为

$$\cos\theta = \frac{\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{n}_S}{|\boldsymbol{r}| \cdot |\boldsymbol{n}_S|}\ , \qquad (5)$$

沉积角余弦为

$$\cos\varphi = \frac{\boldsymbol{r} \cdot \boldsymbol{n}_p}{|\boldsymbol{r}| \cdot |\boldsymbol{n}_p|}\ , \qquad (6)$$

沉积点 P 位置的膜厚 t_ρ 可以表示为

$$t_\rho = \frac{1}{2\pi}\iint_0^{2\pi} t_s \mathrm{d}\beta \mathrm{d}\omega\ . \qquad (7)$$

设蒸发高度 $H = 140$ cm，蒸发源中心距夹具中心的距离 $L = 130$ cm，球面基板的曲率半径 $R = 1\,152$ cm，钨丝直径 $d = 1$ cm。编写程序，模拟旋转夹具的膜厚分布情况，仿真结果如图 2。由图 2 可以看出，沿径向膜逐渐变厚，边缘处略有下降，膜厚呈中心对称分布。

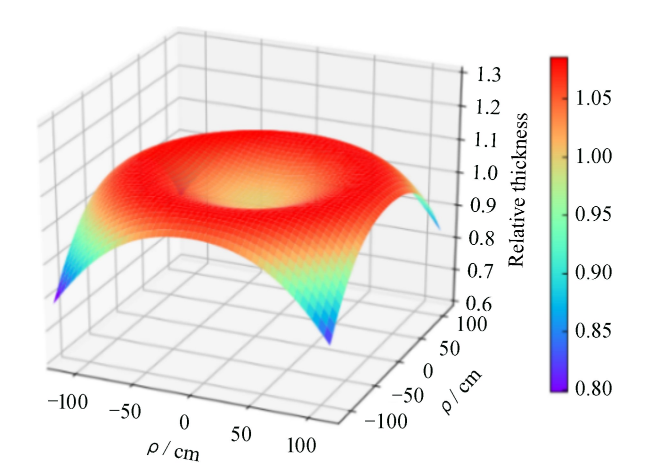


图 2　球面夹具膜厚分布等高图：基板表面膜厚呈中心对称分布，而且中心和靠近边缘位置膜厚相对较薄

Fig. 2　Spherical fixture film thickness distribution contour diagram: the film thickness distribution on the surface of the substrate shows a symmetrical distribution in the center, and the film thickness near the edge is relatively thin

1.2　蒸发源位置对膜厚均匀性的影响

考虑到镀膜机真空室结构限制，蒸发高度只能在 125~140 cm。望远镜镀膜采用自上而下的蒸镀方式，为避免蒸发材料滴落和喷溅到镜面上，实际镀膜 L 只能取 130 cm。由于钨丝蒸发源呈中心对称分布，基板表面的膜厚也具有中心对称分布。为了更加直观地看到膜厚分布情况，本文采用沿半径方向的膜厚数据进行分析。编写程序，模拟不同蒸发源位置对膜厚分布的影响，结果如图 3。

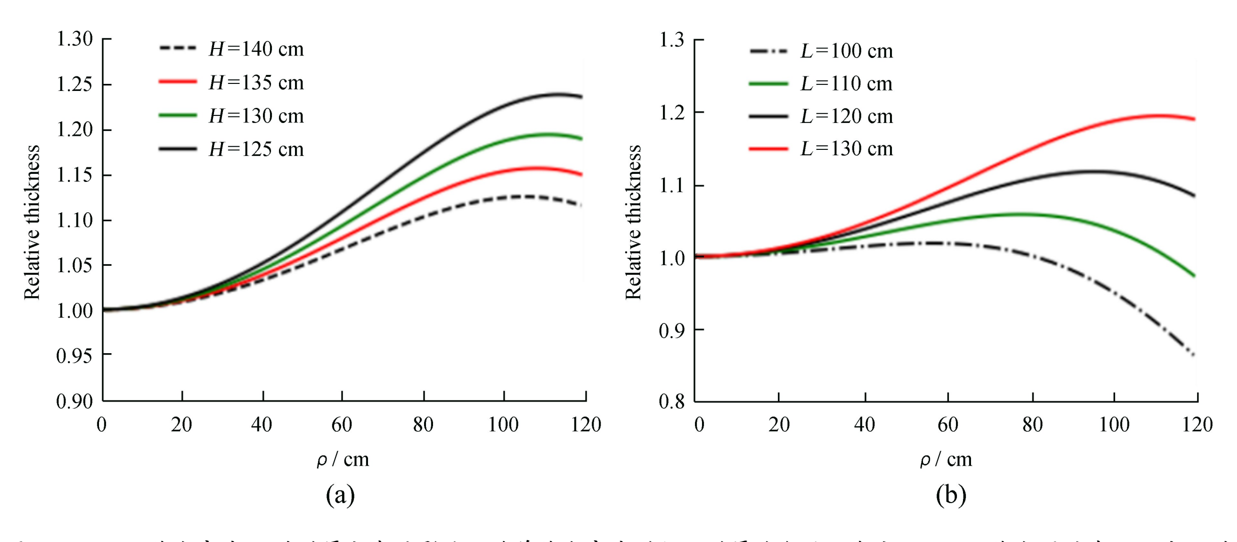


图 3　(a)不同蒸发高度 H 对膜厚分布的影响，随着蒸发高度增加，膜厚均匀性逐渐变好；(b)蒸发源的中心距离 L 对膜厚分布的影响，当 L 接近 110 cm 时，膜厚均匀性较好

Fig. 3　(a) The influence of different evaporation heights H on the film thickness distribution: with the increase of evaporation height, the uniformity of film thickness gradually becomes better; (b) the influence of the center distance L of the evaporation source on the film thickness distribution: when L is close to 110 cm, the uniformity of film thickness is better

本文采用峰谷(PV)值作为膜厚均匀性的评价指标，

$$PV = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\mathrm{avg}}} \times 100\%\ , \qquad (8)$$

其中，t_{max} 为膜厚峰值；t_{min} 为膜厚谷值；t_{avg} 为膜厚平均值。

如表 1，不同蒸发高度情况下的膜厚峰谷值，H 表示蒸发高度，峰谷表示膜厚均匀性。由表 1 可以看出，在一定的蒸发高度范围内，增加蒸发高度可以获得更好的膜厚均匀性，但是增加程度有限。图 3 直观展示了随着蒸发高度增加，膜厚均匀性逐渐变好。但是，考虑到大口径望远镜镀膜情况的特殊性，ZZ3200-1/G 型镀膜机真空室几何尺寸有限以及真空泵的极限真空度等因素，不能仅仅依靠增加蒸发高度来获得更优的膜厚均匀性，必须结合实际情况，对蒸发源布局进行优化或者设计专用的修正挡板对膜厚均匀性进行控制。

表 1 不同蒸发高度 H 对应的膜厚峰谷值：蒸发高度分别为 125 cm，130 cm，135 cm 和 140 cm 时对应的膜厚均匀性峰谷值

Table 1 PV values corresponding to film thickness H with different evaporation heights: PV values corresponding to film thickness uniformity of 125 cm, 130 cm, 135 cm and 140 cm respectively

H/cm	PV/%	H/cm	PV/%
125	21.28	135	14.44
130	17.63	140	11.71

2 膜厚均匀性的优化设计

因为天文望远镜主镜口径较大，吊装和翻转主镜等操作存在较大风险，通常采用自上而下的蒸发方式，主镜的反射膜朝上，蒸发源置于主镜上方。望远镜实际镀膜时，为了避免主镜翻转，采用自上而下的蒸发方式，防止铝丝喷溅、滴落到镜面上，钨丝蒸发源必须放在主镜上方以外的区域(主镜口径为 2.4 m)，考虑到镀膜机的几何结构限制，蒸发源到旋转中心的距离 L 只能取 130 cm。因此，本文在不改变外圈蒸发源到旋转中心距离的情况下，通过引入修正挡板和增设内圈蒸发源的方式对 2.4 m 主镜反射膜膜厚均匀性进行优化。

2.1 修正挡板设计

由于镀膜机真空室尺寸有限，要避免镀膜过程中蒸发材料滴落到主镜镜面上。因此，钨丝蒸发源最好位于镜面正上方以外的区域，其高度和中心距可调整范围很小。本文在不改变蒸发源中心距的情况下，为大口径镀膜机设计一种圆周对称结构的修正挡板。修正挡板的作用本质上是在蒸发源和镜面之间进行有选择性的遮挡，对膜厚分布进行调控。

如图 4，蒸发源 S 与沉积点 P 连线与修正挡板所在柱面的交点纵坐标用 Z_1 表示；修正挡板下边缘纵坐标用 Z_2 表示。对于基板表面任意一点 P，若 $Z_1<Z_2$，则修正挡板对蒸发源 S 无遮挡，蒸发材料可以由发射点 S 到达沉积点 P，则积分有效，取

$$t_s = \frac{m\cos\theta\cos\varphi}{4\pi\mu r^2}; \tag{9}$$

若 $Z_1 \geqslant Z_2$，则修正挡板对蒸发源 S 有遮挡，蒸发材料不能由发射点 S 到达沉积点 P，则积分无效，取 $t_s=0$，再将 t_s 代入(7)式进行膜厚计算。

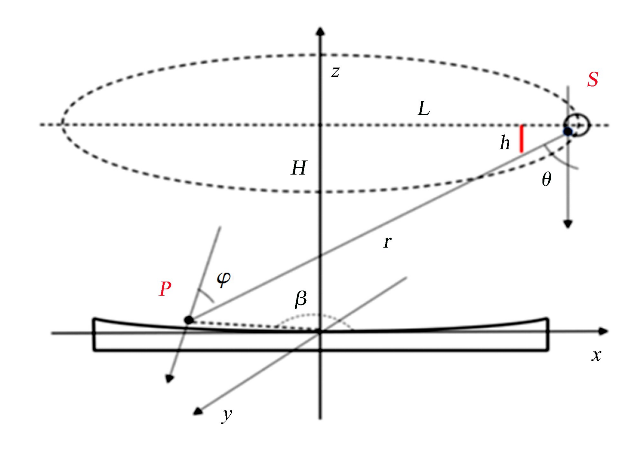


图 4 修正挡板结构示意图，在蒸发源内侧一周增加修正挡板，h 表示挡板的高度

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of the correction mask, the correction mask is added on an inner circle near the evaporation source, and h indicates the height of the mask

考虑到望远镜实际镀膜需求，蒸发源到旋转中心的距离 $L=130$ cm 不变，设修正挡板曲率半径为 R_d，在适当增加蒸发高度的情况下，模拟过程考虑钨丝蒸发源的形状，需要对螺旋状钨丝上的每一点进行计算，对 72 组钨丝上所有点进行积分就能得到基板表面任意一点的膜厚。编写程序对基板上任意一点 P 和蒸发源 S 以及修正挡板之间的位置关系进行判断，精确计算修正挡板对大

口径球面基板膜厚均匀性的影响。

修正挡板优化结果如图 5，实线和虚线分别表示加入修正挡板前后基板表面沿径向的膜厚分布情况。显然修正挡板对大口径基底膜厚分布起到了较好的控制作用。模拟结果表明，在蒸发源到旋转中心的距离不变的情况下，蒸发高度增加至 140 cm，修正挡板高度 $h = 5.2$ cm、曲率半径 $R_d = 123$ cm 时，对膜厚分布的控制效果最佳。理论上挡板能够将口径 2.4 m 的球面基板表面的膜厚均匀性峰谷值降至 2.51%。修正挡板难以避免地存在安装误差，误差量采用手动安装挡板实际的曲率半径与优化设计的最优解之间的偏移量 δ 表示，模拟偏移量对膜厚均匀性峰谷值的影响。

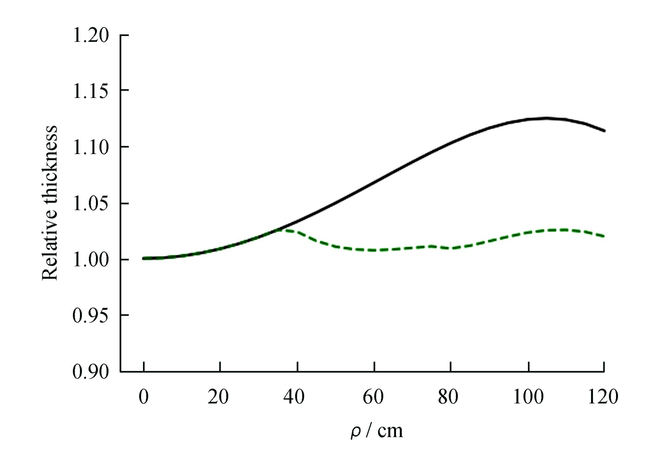


图 5　引入修正挡板前后的膜厚分布曲线。横坐标表示沉积点 P 的位置半径，纵坐标表示相对膜厚，实线表示未加入修正挡板时的膜厚分布曲线，虚线表示加入修正挡板后，膜厚分布的最佳优化结果

Fig. 5　The film thickness distribution curve before and after the correction mask is introduced. The abscissa indicates the location radius of the deposition point P, and the ordinate indicates the relative film thickness

计算修正挡板的安装误差对膜厚均匀性峰谷值的影响，得出挡板安装的允差范围。模拟结果如图 6。图 6 分别给出修正挡板实际安装半径增加量和减小量对膜厚均匀性的影响，随着安装误差增大，膜厚均匀性峰谷值也逐渐增大，安装修正挡板的最佳曲率半径为 123 cm。在镀膜测试之前，反复手动调整修正挡板的位置，经刻度尺测量可以确认，修正挡板偏移量和手动安装引起的倾斜量所带来的综合误差可以控制在 3 mm 以内。由此可见，在考虑修正挡板安装误差的情况下，膜厚均匀性峰谷值可以控制在 4%以内。

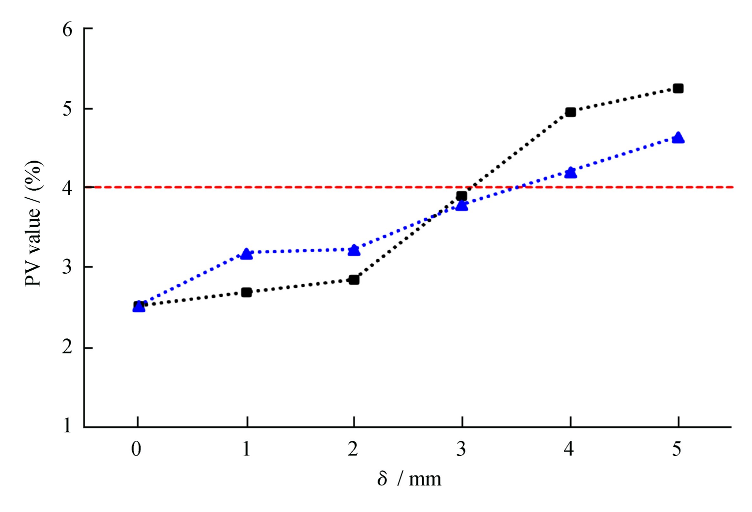


图 6　修正挡板安装误差对膜厚均匀性的影响：横坐标表示挡板安装的偏移量 δ，纵坐标表示膜厚峰谷值，蓝色曲线表示挡板曲率影响，黑色曲线表示挡板曲率半径减小量对膜厚均匀性峰谷值的影响

Fig. 6　Correction mask installation error on the uniformity of film thickness: the abscissa indicates the offset of the mask installation, and the ordinate indicates the PV value of the film thickness; the blue curve indicates the influence of the increase in the radius of mask curvature on the PV value of film thickness uniformity, the black curve indicates the influence of the decrease in the radius of curvature of the baffle on the PV value of film thickness uniformity

2.2　双圈蒸发源设计

2.4 m 天文望远镜采用 RC 系统，其主镜中心具有圆孔结构，可以将蒸发源置于圆孔正上方，能够保证在避免镀膜过程中膜材料滴落现象的前提下，形成内外双圈蒸发源布局。如图 7，由于内圈蒸发

源在基底表面形成的膜厚分布由中心到边缘呈现下降趋势，外圈蒸发源在基底表面形成的膜厚分布由中心到边缘呈上升趋势。通过优化内外圈蒸发源的位置和相对数量，两圈蒸发源对反射膜膜厚的贡献相互补偿，从而获得满足膜厚均匀性需求的膜厚分布。

如图 8，双圈蒸发源布局的优化结果表明，当蒸发高度 $H = 130$ cm、内圈蒸发源的中心距 $L = 10$ cm、外圈蒸发源的中心距 $L = 130$ cm 并且满足外圈蒸发源的数量接近内圈蒸发源的 12 倍时，膜厚均匀性峰谷值为 1.85%。该方案优化结果能够满足目前大口径反射式望远镜膜厚均匀性的要求。

为了避免主镜翻转，采用自上而下的蒸发方式，防止铝丝喷溅、滴落到镜面上，钨丝蒸发源必须放在主镜上方以外的区域，考虑到镀膜机的几何结构限制，蒸发源到旋转中心的距离只能取 130 cm。以上两种优化方案均是在不改变外圈蒸发源到旋转中心距离的情况下设计的，主要通过修正挡板和调整内外圈蒸发源的相对数量对膜厚分布进行优化。由于修正挡板距离蒸发源的位置太近，挡板安装位置的误差会造成遮挡区域的变化进而影响膜厚分布，需要对挡板曲率半径进行精确计算并给出允差范围。与修正挡板不同，蒸发源尺寸相对于镀膜机真空室尺寸较小，而且双圈蒸发源的位置可以准确固定，其位置误差对膜厚均匀性影响较小，该方案需要严格控制双圈蒸发源数量的相对比例。

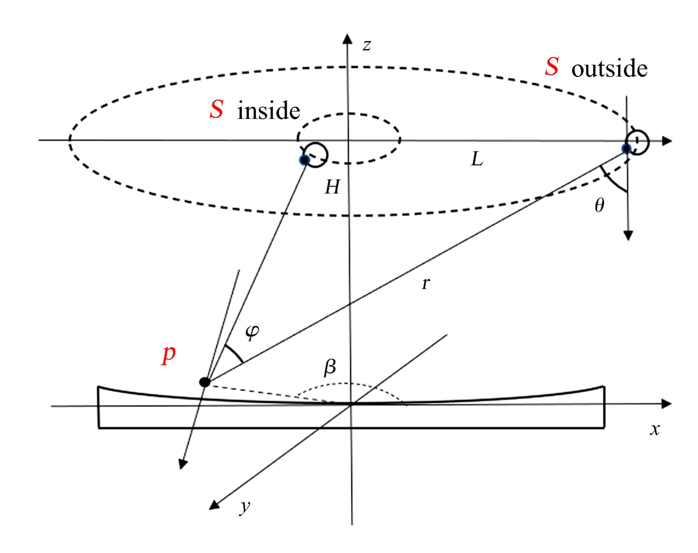


图 7　双圈蒸发布局。蒸发高度为 130 cm，内圈蒸发源中心距等于 10 cm，外圈蒸发源中心距等于 130 cm

Fig. 7　Double circle evaporation layout: the evaporation height is 130 cm, the center distance of the inner ring evaporation source is equal to 10 cm, and the center distance of the outer ring evaporation source is equal to 130 cm

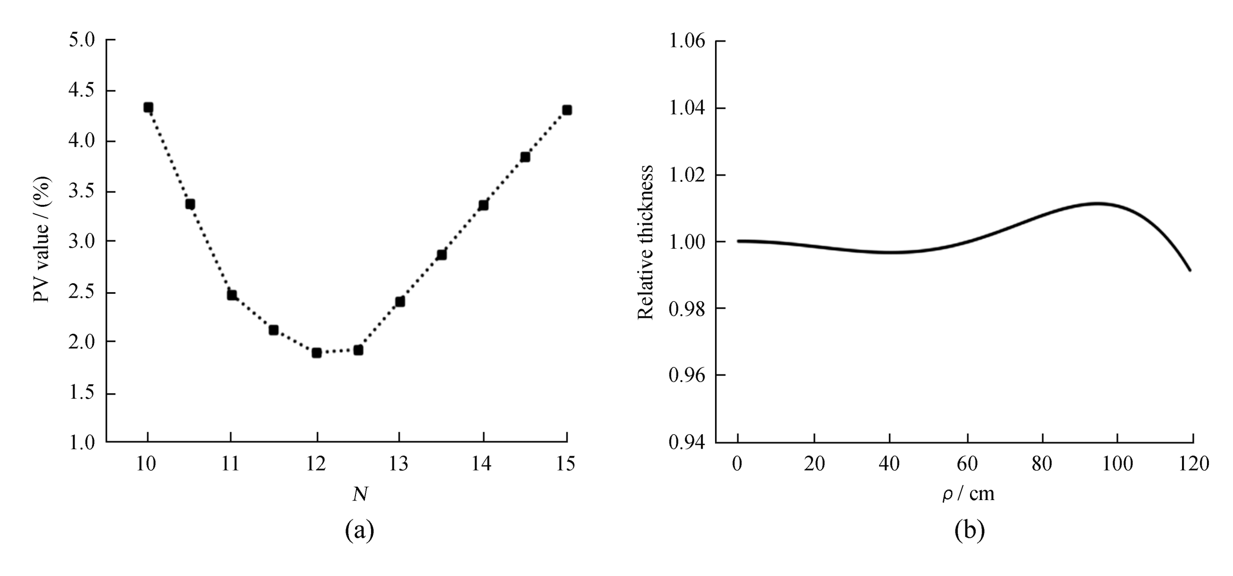


图 8　(a) 不同的外圈蒸发源数量与内圈的比值 N 对应的膜厚峰谷值：N 值接近 12 时，对应的峰谷值最小；(b) $N = 12$ 时双圈蒸发源膜厚分布优化结果：横坐标表示沉积点 P 的位置半径，纵坐标表示相对膜厚

Fig. 8　(a) The different film thickness PV values corresponding to the ratio N of the number of evaporation sources in the outer ring to the inner ring: when the N value is close to 12, the corresponding PV value is the smallest; (b) the optimization results of the film thickness distribution of the double-loop evaporation source at $N = 12$: the abscissa represents the radius of the position of the deposition point P, and the ordinate represents the relative film thickness

3 结 论

本文针对大口径反射式天文望远镜镀膜膜厚均匀性分布进行研究，充分考虑大口径望远镜镀膜的特殊性和 ZZ3200-1/G 型真空镀膜机的几何结构，针对 2.4 m 主镜镀膜，在不改变外圈蒸发源到旋转中心距离的情况下，提出两种优化膜厚均匀性的设计方案。方案一，设计一种专门用于大口径基板的圆对称结构的修正挡板，镀膜过程中挡板与反射镜保持相对静止。优化结果表明，当修正挡板安装误差在 3 mm 以内，膜厚均匀性峰谷值由优化前的 15%降至 4%以内。该修正挡板结构简单，对大口径镀膜具有很强的适用性，但是挡板安装精度要求较高。方案二，考虑到主镜中心具有圆孔结构，设计双圈蒸发源布局。优化结果表明，当内、外圈蒸发源的中心距分布为 10 cm 和 130 cm，并且满足外圈蒸发源的数量为内圈的 12 倍时，膜厚均匀性的峰谷值为 1.85%。基于上述优化结果，我们考虑下一步采用方案二对 ZZ3200-1/G 型真空镀膜机进行升级改造，进一步提高 2.4 m 主镜膜厚均匀性。上述优化方法不仅可以用于指导大尺寸镀膜机的研制工作，也能为大口径天文望远镜镀膜工作提供借鉴。

参考文献：

[1] 唐晋发，顾培夫，刘旭，等. 现代光学薄膜技术 [M]. 杭州：浙江大学出版社，2006：271-285.
TANG J F, GU P F, LIU X, et al. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 271-285.

[2] WANG B, FU X H, SONG S G. Simulation and optimization of film thickness uniformity in physical vapor deposition [J]. Coatings, 2018, 8(9): 325.

[3] KOTLIKOV E N, PROKASHEV V N, IVANOV A, et al. Thickness uniformity of films deposited on rotating substrates [J]. Journal of Optical Technology, 2009, 76(2): 100-103.

[4] 艾万君，熊胜明. 3.6 m 大口径镀膜机膜厚均匀性分析 [J]. 光电工程，2011，38(11)：73-78.
AI W J, XIONG S M. Analysis of film thickness uniformity for large aperture coater of 3.6 m in diameter [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 73-78.

[5] NOGUCHI T, KANZAWA T, YUTANI M, et al. Coating of the 8.3 m primary mirror of the Subaru telescope [J]. Report of the National Astronomical Observatory of Japan, 1999, 4(3): 129-137.

[6] 伦宝利. 大口径天文光学望远镜主镜镀膜的研究 [D]. 昆明：中国科学院云南天文台，2013.
LUN B L. Research on mirror coating of large diameter astronomical optics telescope [D]. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2013.

[7] 林坚，林永钟，廖群峰. 光学薄膜厚度修正挡板的设计 [J]. 光子学报，1999(9)：841-845.
LIN J, LIN Y Z, LIAO Q F. Design of closure for thickness revising of optical film [J]. Acta Photonica Sinica, 1999(9): 841-845.

[8] WANG G, BAI Y L, ZHAO J, et al. Optimization of thickness uniformity distribution on a large-aperture concave reflective mirror and shadow mask design in a planetary rotation system [J]. Coatings, 2021, 11(2): 140.

[9] 程敏，艾力·伊沙木丁，孙正文，等. 大口径非球面镀膜均匀性分析与修正挡板设计 [J]. 真空科学与技术学报，2017，37(3)：250-254.
CHENG M, YISHAMUDING A L, SUN Z W, et al. Novel correction mask for thickness uniformity improvement of coatings on large aperture aspheric surface [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(3): 250-254.

[10] 孙伟超，许竞，林星魁，等. 光学望远镜镜片旋转镀膜修正挡板的仿真设计［J］. 表面技术，2022，51(4)：342-347.
SUN W C, XU J, LIN X K, et al. Simulation design of correction masks for optical telescope mirrors in rotating coating system [J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 342-347.

[11] 潘永刚，刘政，王奔，等. 电子束蒸发球面夹具系统膜厚均匀性的研究［J］. 激光与光电子学进展，2021，58(5)：331-335.
PAN Y G, LIU Z, WANG B, et al. Research on film thickness uniformity of electron beam evaporation spherical fixture system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 331-335.

Optimized Design of 2.4 m Primary Mirror Reflective Film Thickness Uniformity

Chen Jianhui[1,2,3], Lun Baoli[1,2*], Qin Songnian[1,2]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China, Email: lunbl@ynao.ac.cn;
2. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Film thickness uniformity is an important indicator for the preparation of high-performance optical films. In order to further improve the uniformity of the film thickness of the 2.4 m primary mirror reflective film, an optimization scheme for the film thickness uniformity of the large-aperture telescope coating is designed. Based on the cosine distribution law followed by vacuum thermal evaporation, combined with the geometry of ZZ3200 vacuum coater and the actual needs of telescope coating, a film thickness calculation program is written to simulate the theoretical distribution of film thickness. The film thickness optimization design method and optimization results are given. Method 1: Add a correction mask at a suitable position inside the evaporation source, the results show that the radius of curvature of the mask is installed within 3 mm, and the Peak to Valley value of film thickness inhomogeneity decreases from 15% to 4% without mask, this method has certain universality, but the installation position of the mask should be accurately controlled; Method 2: Combined with the circular hole structure in the middle of the reflection primary mirror, the double ring evaporation source is designed, and the results show that when the center distance between the inner and outer ring evaporation sources is 10 cm and 130 cm, respectively, and the number of evaporation sources in the outer ring is 12 times that of the inner ring, the PV value of film thickness uniformity is 1.85%, which is designed for the mirror with a round hole in the center, and is suitable for most reflective astronomical telescope coatings.

Key words: telescopic coating; film thickness uniformity; spherical substrate holder; correction mask